

余炜, 陈刚, 廖克武, 等. 降雨条件下含软弱夹层花岗岩残积土边坡稳定性分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 142–150. [YU Wei, GAO Pinghong, HUANG Haijiang. Stability Analysis of Slope with Weak Interbedded Granite Residual Soil Under Rainfall Conditions[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 142–150]

## 降雨条件下含软弱夹层花岗岩残积土边坡稳定性分析

余炜<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 廖克武<sup>1</sup>, 黄海江<sup>2</sup>

(1. 浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司, 杭州 310030; 2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

**摘要:** 为研究降雨入渗作用下含软弱夹层边坡稳定性问题, 减少滑坡灾害的发生, 以实际边坡工程为例, 采用有限差分软件建立了三维边坡数值模型, 分析了含软弱夹层边坡土体的孔隙水压力、位移场、塑性区、速度场和最大剪应变增量场变化规律, 并探究了软弱夹层厚度对边坡稳定性的影响。结果表明: 持续性降雨使得软弱夹层处出现贯通连续的剪切塑性区, 同时剪切塑性区随着降雨时间增加扩大; 随着降雨时间的增加, 软弱夹层的位移、孔隙水压力、最大剪应变增量以及滑移速度增大, 应力与强度比减小; 长时间的降雨使得含软弱夹层边坡沿着软弱夹层所处的潜在滑移面进行滑移, 边坡的失稳变形破坏主要由软弱夹层变化所引起, 并且变形随降雨时间的增加而加剧; 软弱夹层的存在会对夹层上下界面的孔隙水压力大小产生影响, 孔隙水压力自坡面向软弱夹层方向逐渐增大; 降雨时间的增加和软弱夹层的存在都会降低边坡的稳定性, 在降雨条件相同时, 边坡的安全系数随软弱夹层厚度的增大而下降。

**关键词:** 降雨入渗; 边坡稳定性; 孔隙水压; 软弱夹层; 塑性区

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0142-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.16

## Stability Analysis of Slope with Weak Interbedded Granite Residual Soil Under Rainfall Conditions

YU Wei<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, LIAO Kewu<sup>1</sup>, HUANG Haijiang<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Huadong Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** In order to study the stability of slopes with weak interlayer under rainfall infiltration effect and reduce the occurrence of landslide disasters, an actual slope project was taken as an example, and the finite difference software was used to establish a three-dimensional slope numerical model. The pore water pressure, displacement field, plastic zone, velocity field, and the maximum shear strain increment field of the slopes with weaker interlayer were analyzed, and the influence of the thickness of weak interlayer on slope stability was studied. The results show that continuous rainfall makes a through and continuous shear plastic zone appear at the weak interlayer. At the same time, the shear plastic zone expands with the increase in rainfall time. With the increase in

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078285)

作者简介: 余炜(1986-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计及研究工作。

E-mail: 408379275@qq.com

rainfall time, the displacement, pore water pressure, the maximum shear strain increment, and the slip velocity of the weak interlayer increase, and the ratio of stress to strength decreases. The prolonged rainfall makes the slopes with weak interlayer slip along the potential slip surface of the weak interlayer. The destabilizing deformation of the slopes is mainly caused by the change of the weak interlayer, and the deformation is intensified with the increase in rainfall time. The existence of the weak interlayer affects the pore water pressure at the interface between the upper and lower weak interlayer, and the pore water pressure gradually increases from the slope towards the direction of the weak interlayer. The increase in rainfall time and the existence of the weak interlayer both reduce the stability of the slopes. When the rainfall conditions are the same, the safety factor of the slopes decreases with the increase in the thickness of the weak interlayer

**Keywords:** Rainfall infiltration; Slope stability; Pore water pressure; Softly interbedded rock; Plastic zone

## 0 引言

滑坡作为一种严重的地质灾害,给国民经济和人民生命财产造成重大损失<sup>[1]</sup>。陈丽霞等<sup>[2]</sup>对近三十年以来江西省的滑坡数据进行统计与分析,其中由降雨诱发的滑坡占比接近80%。由此可见,降雨是诱发边坡滑坡的主要因素。刘广宁等<sup>[3]</sup>对三峡库区李家湾滑坡以及Xiao等<sup>[4]</sup>对黄堆坡滑坡的研究表明,这些滑坡是由弱夹层诱发的。因此研究降雨及软弱夹层对边坡稳定性的影响是当前亟待需解决的一个问题。

现有降雨入渗条件下边坡渗流场和稳定性的研究主要通过实地调查和实地监测、模型试验和数值分析等方式进行。在野外调查与监测方面,Li等<sup>[5]</sup>结合野外调查与监测,分析了降雨对含软弱岩层边坡破坏机理和形成过程的影响,发现边坡变形存在降雨引发的加速滑坡期阶段。Yan等<sup>[6]</sup>通过钻探试验和位移监测,分析了高度风化凝灰岩对滑坡形成机理的影响,发现逐渐风化的软弱夹层大大降低了边坡的稳定性。Liu等<sup>[7]</sup>基于无人机数码摄影测量和GB-SAR监测,分析了降雨量对降雨型滑坡形成机理的影响,疏松土质和泥岩高度风化的砂岩夹层为雨水和地下水渗漏奠定了基础。

在模型试验研究方面,Yang等<sup>[8]</sup>利用三层边坡模型模拟了较弱夹层的岩石边坡,研究了强降雨下边坡的稳定性,发现孔隙水压力变化和降雨侵蚀是导致弱夹层剪切能力逐渐降低的两个主要因素。王睿<sup>[9]</sup>等利用离心模型试验对降雨条件下含软弱夹层粘性土坡进行了研究,结果显示,软弱夹层的存在造成了降雨入渗分布的变化,从而影响了边坡的稳定性。甘建军等<sup>[10]</sup>运用三轴试验,研究了灰岩区降雨型滑坡中粉质黏土软弱夹层的强度与变形特性,

提出了基于Fredlund非饱和土双应力强度理论的滑坡滑带土抗剪强度修正公式。姚裕春等<sup>[11]</sup>通过离心模型试验研究了不同含水量的边坡破坏机理,不同含水量引起不同形式的边坡破坏,并指出含水量超过损伤变量突变点时,边坡损伤将加速发展。

试验虽然可以从宏观的角度来分析降雨诱发边坡失稳机理,但无法对降雨作用下边坡稳定性变化的细观机理进行研究。在数值模拟以及其与试验结合的研究中,其中Xu等<sup>[12]</sup>利用纳米压痕实验和数值模拟来研究了弱夹层中的页岩,浸水后页岩的弹性模量和内聚力显著降低,弱夹层的抗剪强度显著降低,塑性带沿弱夹层发展,导致滑坡。Pan等<sup>[13]</sup>通过结合水—岩弱化效应的数值模拟,考虑水对岩石力学行为的影响,可以更准确地分析边坡在降雨条件下的稳定性。Zhuang等<sup>[14]</sup>采用数值模拟方法,研究了降雨渗透和复杂地质条件(断层和弱夹层)对岩石边坡稳定性的影响。Sun等<sup>[15]</sup>利用数值模拟方法,研究了降雨引发的涉及弱夹层的滑坡案例,表明虹吸排水法能有效控制地下水位,提高边坡稳定性。刘杨<sup>[16]</sup>等运用数值模拟方法,研究了含缓倾软弱夹层矿山高边坡的降雨渗流特性,得出了软弱夹层作为隔水层改变了降雨的渗流路径和浸润曲线形态。李水江等<sup>[17]</sup>利用有限差分软件分析了加筋土边坡在不同含水率条件下的位移、应力、加速度响应,结果表明加筋土界面的含水率会对加筋边坡水平位移产生较大的影响。刘洪波等<sup>[18]</sup>采用有限差分法软件研究了不同含水率对花岗岩残积土边坡位移场、加速度场和锚固轴力的影响,结果表明含水率与坡体水平位移、锚杆轴力呈正相关。谢瑾荣等<sup>[19]</sup>通过数值模拟研究了降雨入渗条件下软岩边坡的软化效应,研究表明降雨前期软岩边坡的稳定性受渗流效应影响较大,而在降雨后期软岩软化效应将占据主导作用。蒋中明等<sup>[20]</sup>利用FLAC3D软件对各单

元强度和重度进行修正, 研究结果表明综合考虑软岩的基质吸力、自重变化和软化效应影响下的软岩边坡稳定性分析更加合理。Xu等<sup>[21]</sup>运用了直剪试验和数值模拟方法, 研究了软弱夹层土壤的含水量变化对碎屑岩边坡稳定性的影响。

钟卓希等<sup>[22]</sup>运用了基于渗流-应力耦合的饱和-非饱和渗流理论, 建立了含软弱夹层等效裂隙面边坡渗流模型, 研究了不同降雨工况下含软弱夹层边坡的渗流特性, 得出了等效裂隙面模型能更符合实际工程中边坡渗透系数增长和稳定性变化的结论。侯世伟<sup>[23]</sup>等在强度折减法的基础上, 基于雨水对土体应变软化作用, 提出了更适用于工程应用的阶梯双折减法。

以上研究虽然有研究揭示了降雨入渗对边坡的影响, 但均缺乏对降雨条件下含软弱夹层花岗岩残积土边坡内部孔隙水压力分布、位移场、塑性区、速度场和最大剪应变增量场的具体分析。本文将利用数值模拟的方法, 对降雨条件下含软弱夹层花岗岩残积土边坡的变形规律和稳定性进行研究, 旨在为地质灾害的防治和减灾提供基础数据和科学支持。

## 1 含软弱夹层边坡降雨模型

### 1.1 工程概况

本工程位于苍南县, 属低山地貌单元。工程场地位于山体东南侧边坡上, 地面高程在54~121 m

之间, 地形起伏较大, 地形坡度一般在 $50^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ 之间, 场区原始植被较发育。

边坡属于花岗岩残积土边坡, 表层有少量植被, 为层状结构边坡, 整体山地边坡高度较高, 属于超高边坡, 坡度上部高程为116.5 m。整体坡面长度介于100~300 m之间, 属于中长边坡; 山坡上表面为 $30^{\circ}$ 左右, 属于陡坡, 山坡下部局部坡度达到 $55^{\circ}$ 。

### 1.1 计算方法及模型

各土层的分布以及物理力学性质分别如图1和表1所示。根据实际边坡工况建立模型, 数值计算模型如图1所示。模型几何尺寸为: 高42 m, 长78 m, 宽20 m, 坡的基层高16 m, 上部平台左侧设置了混凝土挡墙约束, 平台长34 m, 坡面上段坡度约为 $30^{\circ}$ , 坡面下段坡度倾斜较大段约为 $55^{\circ}$ 。软弱夹层处于全风化花岗岩岩层之中, 是一条狭长连通的软弱夹层。岩石与土体的本构模型均采用摩尔库伦模型, 在模型上表面设置100 ml/d的降雨边界条件, 降雨历时19 h, 降雨入渗后的渗流运动则服从达西定律。土体的渗透系数如表1所示。

在边坡模型中软弱夹层的内部布置监测点, 从左到右依次为1-7号监测点, 并且在软弱夹层上方与下方0.2 m处各布置一个监测点, 如图2所示。每个检测点名称以三个字母与一个数字组合命名, 首字母t、d及m分别代表位于夹层的上、下及内部的方位, 其余两字母代表类型, 如pp代表孔隙水压, 数字代表监测点位。

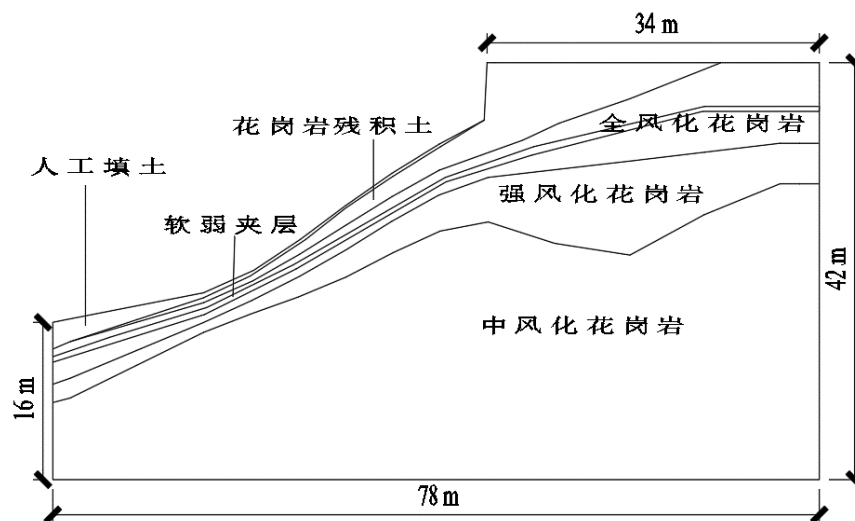


图1 含软弱夹层边坡剖面图

Fig.1 Slope profile with weak interlayer

表1 土的物理力学及水力参数  
Table 1 Physical-mechanical and hydrological parameters of soil

土体类别	粘聚 $c/(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
人工填土	14	10	$2.89\times 10^{-5}$
花岗岩残积土	22	12	$2.78\times 10^{-5}$
软弱夹层	8.7	20	$2.67\times 10^{-5}$
全风化花岗岩	35	26	$1.73\times 10^{-5}$
强风化花岗岩	200	33	$1.16\times 10^{-7}$
中风化花岗岩	300	45	$1.16\times 10^{-8}$

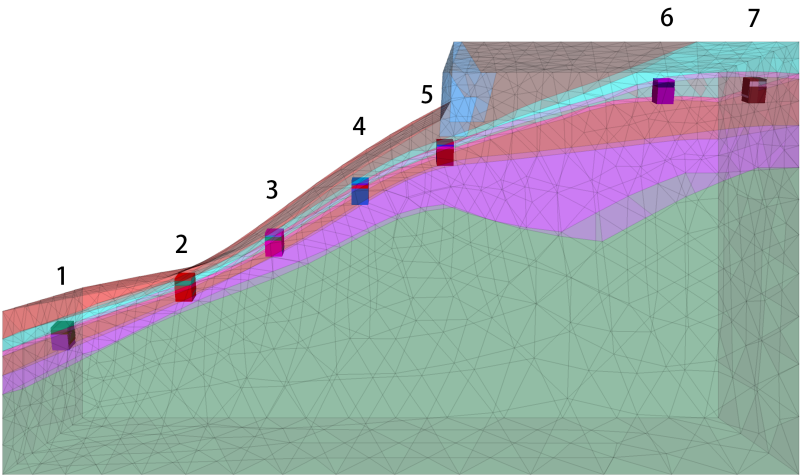


图2 监测点位布置图  
Fig.2 Layout of monitoring points

2 边坡稳定性分析

2.1 降雨入渗对孔隙水压力的影响分析

图3为边坡监测点孔隙水压力变化图,从图3可以看出:在降雨阶段,边坡软弱夹层的存在使得夹层上下的孔隙水压力有所变化,软弱夹层由夹层上向夹层下方向孔隙水压力递减。图4为坡面中段的监测点4方向上的孔隙水压力变化图。由图4可以看出:随着降雨历时增加至16 h,夹层上方的孔隙水压力由18 kPa增至21 kPa,增加了16.7%,在同一降雨时间时比夹层内部孔隙水压力大约5 kPa,比夹层下方的点位的孔隙水压力大8 kPa。其原因是软弱夹层的保水性较强,大量水在软弱夹层下方汇聚难以快速渗透进入下方土体,使得软弱夹层的孔隙水压力增加,并且易使得软弱夹层处形成潜在滑移面,降低边坡稳定性,减小边坡的安全系数。

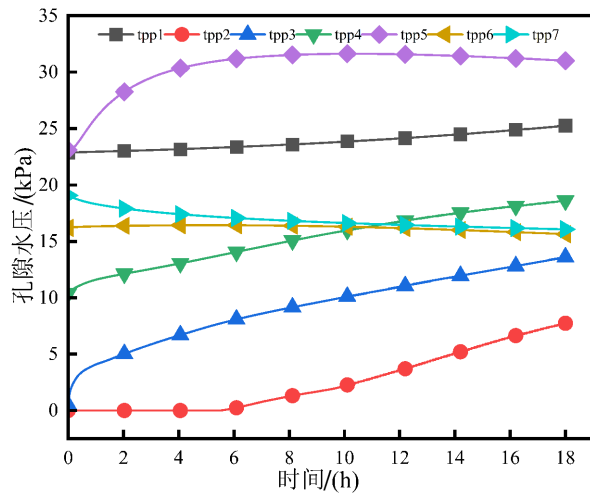
2.2 边坡最大剪应变增量、速度场分析

通过边坡的最大剪应变增量可以来识别潜在的滑移面,由图5所示,边坡的潜在滑移面处于软弱夹层处。软弱夹层也是剪切应变的集中区域,因为软弱夹层通常具有较低的抗剪强度和较高的透水性,这一特性会改变流体的渗流路径,增加孔隙水压力,从而降低了边坡的稳定性。

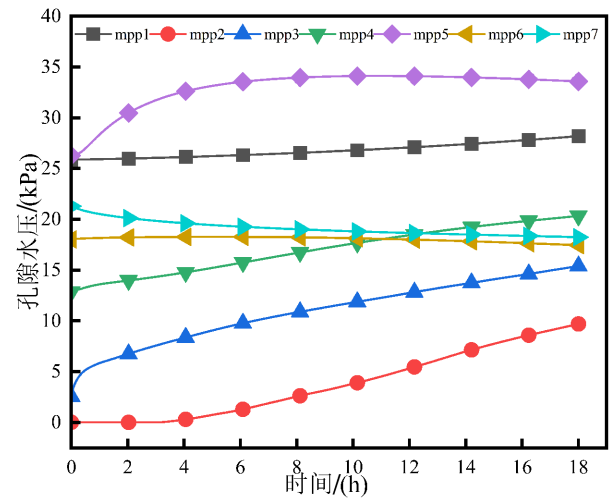
根据图6可知,随着降雨时间的增加边坡的最大剪应变增量逐渐增加,这也意味着边坡的稳定性逐渐减小,边坡不断的经历着加速的变形,土体将沿着软弱夹层所在的潜在滑移面进行滑动。

由图7可知,边坡的土体的最大速度为16 mm/s,随着降雨时间的增加,土体的滑移速度随着降雨时间的增加而增大,边坡土体的滑动速度在前4 h内由0 mm/s增加至0.2 mm/s,平均每小时增加0.05 mm/s,为缓慢上升阶段;在4~18 h内,土体滑动速度由0.2 mm/s上升到1.6 mm/s,平均每小时上升0.1 mm,为快速上升阶段。

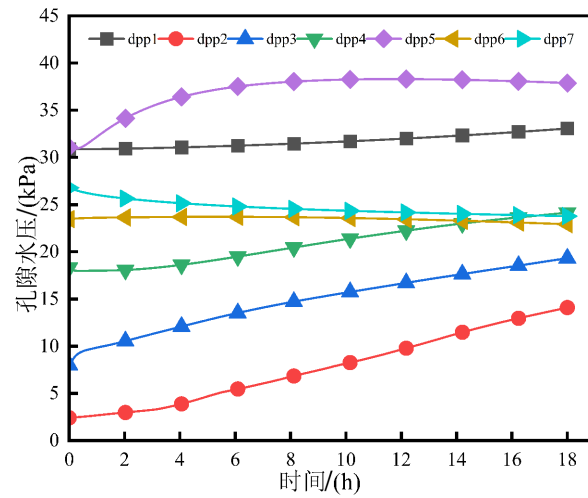




(a) 软弱夹层上方1-7点位孔隙水压力图



(b) 软弱夹层内1-7点位孔隙水压力图



(c) 软弱夹层下方1-7点位孔隙水压力图

图3 边坡监测点孔隙水压力变化图

Fig.3 Variation of pore water pressure at slope monitoring points

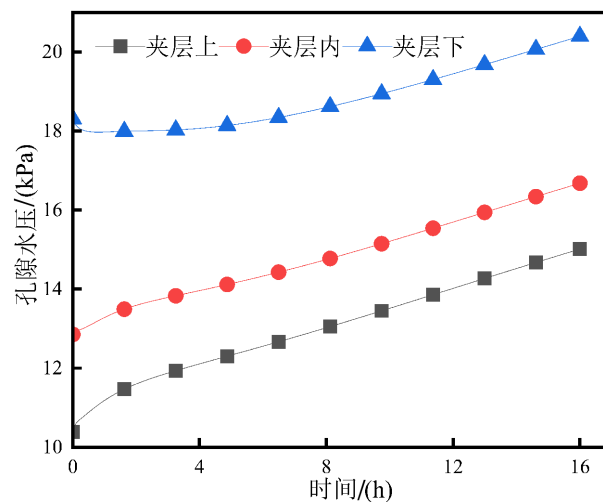


图4 软弱夹层在4点方向孔隙水压力变化图

Fig.4 Variation of pore water pressure in weak interlayer at monitoring point 4

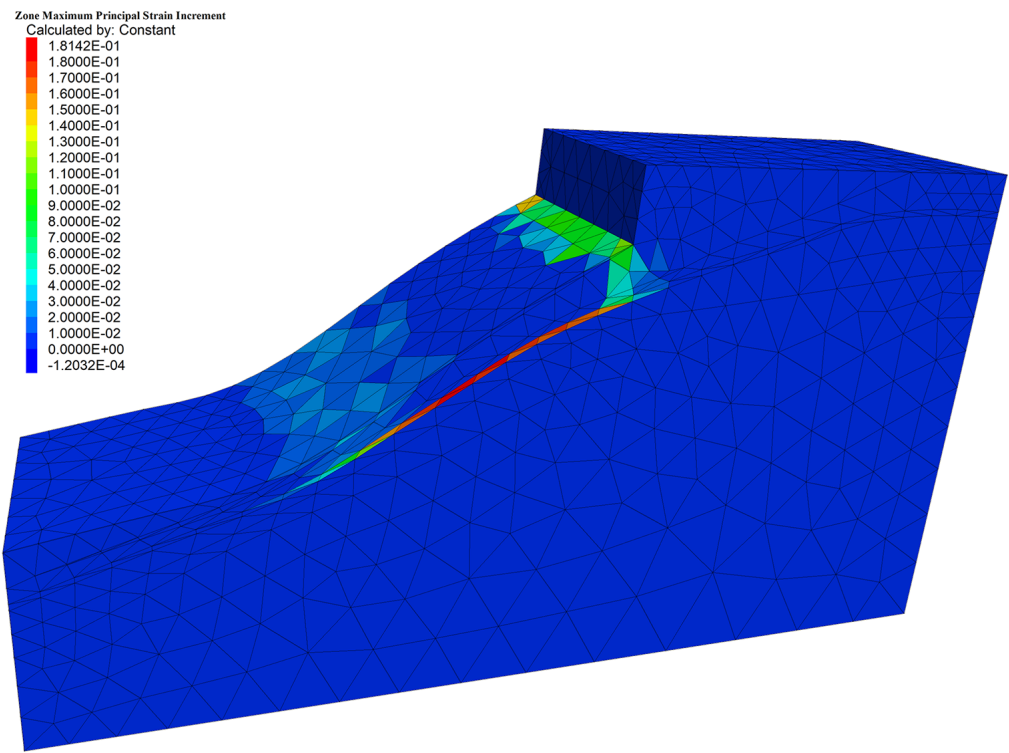


图 5 降雨 2 h 边坡最大剪应变增量云图

Fig.5 Cloud map of the maximum shear strain increment of the slope under two hours of rainfall

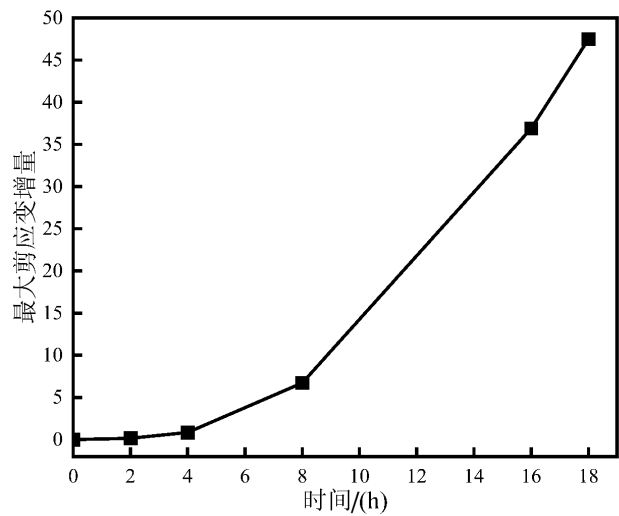


图 6 不同降雨时长最大剪应变增量图

Fig.6 Maximum shear strain increment under different rainfall durations

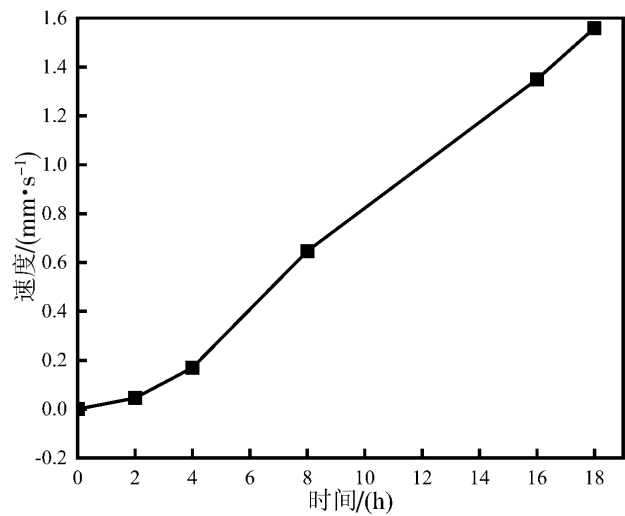


图 7 不同降雨时长边坡最大速度图

Fig.7 Maximum velocity of slope under different rainfall durations

2.3 边坡塑性区分析

随着降雨的进行，边坡内的部分土体会进入屈服阶段，从而产生塑性区，根据边坡塑性区是否贯通的分布情况可以分析判断边坡是否失稳。

据图 8 显示，在 6 h 边坡坡面段虽然分布了大量的剪切破坏塑性区，并且随着降雨时间的增加，塑性区缓慢扩展，但是始终未形成大面积连续贯通的剪切破坏塑性区域。

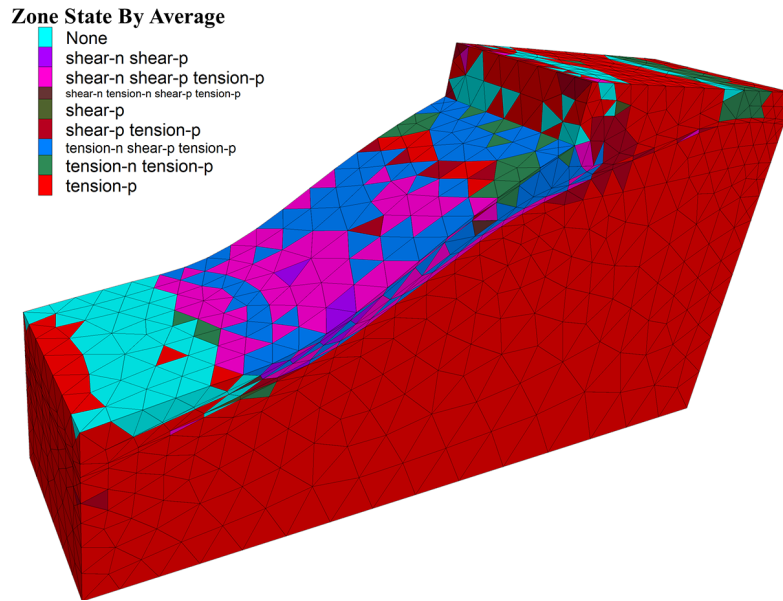


图8 降雨6 h边坡塑性区云图

Fig.8 Cloud map of slope plastic zone under six hours of rainfall

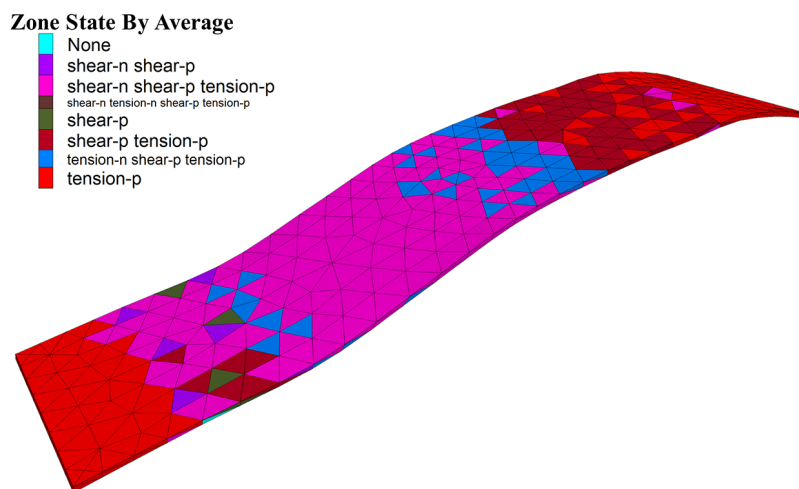


图9 降雨6 h软弱夹层塑性区云图

Fig.9 Cloud map of plastic zone with weak interlayer under six hours of rainfall

图9为边坡局部的软弱夹层塑性区云图,分析可知在6 h软弱夹层出现了大面积贯通连续的剪切破坏塑性区,并且随着降雨历时达到了19 h,坡面两侧的拉伸破坏塑性区逐渐演变为拉伸和剪切破坏塑性区,剪切破坏的塑性区逐渐扩大。其原因是降雨作用下,软弱夹层的孔隙水压力增大,有效应力减小,导致土体的抗剪强度降低,同时土体的软化效应使得粘聚力以及摩擦角减小,促使塑性区发生剪切破坏并逐渐扩展,同时形成滑移面。

## 2.4 边坡安全系数分析

图10为3种不同夹层厚度对安全系数影响的变化图。由图可知:夹层厚度由0.25 m增加至0.5 m,安全系数平均降低0.25;夹层厚度由0.5 m增加至0.85 m,安全系数平均降低0.5。对于0.25 m厚软弱夹层,在降雨0~2 h内,安全系数下降0.16,平均每小时下降0.08,为快速下降阶段;在降雨2~16 h内,安全系数下降0.17,平均每小时下降0.012,为缓慢下降阶段。这与图11中无软弱夹层

工况下的变化规律不同,在无软弱夹层工况下,降雨0~16 h阶段为缓慢下降阶段,安全系数降低0.6,平均每小时下降0.037 5;而在降雨16~19 h内,安全系数降低0.9,平均每小时下降0.3,为快速下降阶段,与含软弱夹层边坡的先快后缓不同,趋势为先缓后快。产生上述演变规律的原因为:含软弱边坡由于软弱夹层具有强度低、易变形和显著的流变等特性,在降雨前期就容易受到降雨影响,从而形成沿软弱夹层底面为潜在滑移面的滑坡,属于牵引式滑坡;而对于本文中无软弱夹层边坡,在降雨后期,坡面表层土体达到饱和后,

因为坡面土体自重增大,边坡的滑移力快速增大,导致了安全系数的快速降低形成了滑坡,属于表层滑坡。

综上所述,软弱夹层的厚度对边坡的安全系数有着显著的影响,夹层的厚度越大安全系数降低的越大,两者呈负相关的关系;其次,无论是否存在软弱夹层,安全系数都随着降雨时间的增加而降低;降雨会使软弱夹层的含水率与孔隙水压力上升,抗剪强度的降低,从而降低了边坡的安全系数。

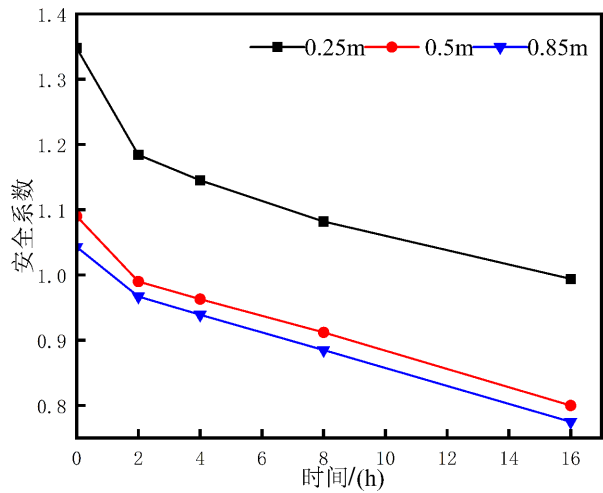


图10 不同夹层厚度边坡安全系数变化图

Fig.10 Variation of safety factor of slope under different thicknesses of waek interlayer

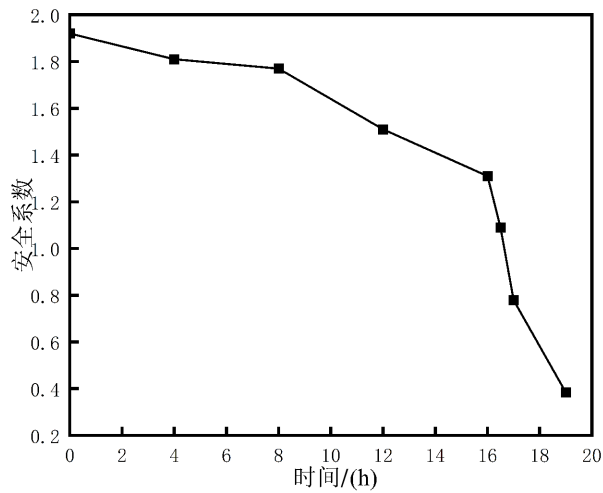


图11 无软弱夹层边坡安全系数变化图

Fig.11 Variation of safety factor of slope without weak interlayer



### 3 结论

(1)在降雨条件下,随着降雨时间的增加,边坡坡面的位移、孔隙水压力、最大剪应增量以及滑移速度增大,应力与强度比减小,同时软弱夹层处塑性区出现贯通的剪切破坏区。

(2)软弱夹层因为其本身较低的抗剪强度以及在降雨作用下抗剪强度的降低,导致其成为潜在滑移面,意味着降雨后边坡的失稳变形破坏主要由软弱夹层变化所引起,并且变形随降雨时间的增加而加剧。

(3)软弱夹层的存在会使得夹层的上下的孔隙水压力有所变化,表现为孔隙水压力由软弱夹层上层向软弱夹层下层方向逐渐增大。

(4)降雨时长和软弱夹层厚度与边坡安全系数呈负相关关系,即降雨时长越长或软弱夹层厚度越大,边坡安全系数越低。

#### 参考文献:

- [1] Kun F , Huiming T , Changdong L , et al. Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review[J]. *Geoscience Frontiers*, 2023, 14(1): 101493.
- [2] 陈丽霞,殷坤龙,刘礼领,等. 江西省滑坡与降雨的关系研究[J]. *岩土力学*, 2008(04): 1114-1120.
- [3] 刘广宁,黄波林,王世昌. 三峡库区巴东李家湾滑坡变形破坏机理研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(08): 39-42+72.
- [4] Xiao Y J, Wang T, Li Y Q. Formation mechanism of complex landslide mass with soft interlayers in reservoir bank[J]. *Coal Geology Explor*, 2018, 46(06): 133-137.
- [5] Li Q , Wang M Y, Zhang B K , et al. Field investigation and numerical study of a siltstone slope instability induced by excavation and rainfall[J]. *Landslides*, 2020, 17(6): 1-15.
- [6] Yan X , Xu B , Zhang L, et al. Mechanism analysis of a landslide in highly weathered volcanic rocks of Niushoushan Hill in Nanjing[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(3-4): 323-337.
- [7] Bo L , Kun H , Mei H , et al. Application of UAV and GB-SAR in mechanism research and monitoring of Zhonghaicun landslide in southwest China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1653-1653.
- [8] Yang Y , Xing H , Yang X , et al. Experimental study on the dynamic response and stability of bedding rock slopes with weak interlayers under heavy rainfall[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(12): 1-16.
- [9] 王睿,张嘎,张建民. 降雨条件下含软弱夹层土坡的离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(10): 1582-1587.
- [10] 甘建军. 灰岩区降雨型滑坡软弱夹层的三轴试验强度研究[J]. *灾害学*, 2019, 34(04): 30-34+72.
- [11] 姚裕春,姚令侃,袁碧玉. 降雨条件下边坡破坏机理离心模型研究[J]. *中国铁道科学*, 2004(04): 65-69.
- [12] Xu J , Tang X , Wang Z , et al. Investigating the softening of weak interlayers during landslides using nanoindentation experiments and simulations[J]. *Engineering Geology*, 2020(277): 105801.
- [13] Pan Y , Wu G , Zhao Z , et al. Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering the water-induced weakening of rock[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020(128): 103806.
- [14] Zhuang Y , Hu X , He W , et al. Stability analysis of a rocky slope with a weak interbedded layer under rainfall infiltration conditions[J]. *Water*, 2024, 16(4): 604.
- [15] Sun H , Pan P , Lü Q , et al. A case study of a rainfall-induced landslide involving weak interlayer and its treatment using the siphon drainage method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4063-4074.
- [16] 刘杨,胡斌,盛建龙,等. 含缓倾软弱夹层矿山高边坡降雨渗流特性研究[J]. *水利水运工程学报*, 2021(05): 67-75.
- [17] 李水江,童艳光,刘飞禹,等. 不同含水率下考虑筋土界面刚度软化的加筋边坡地震响应[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(04): 862-870+877.
- [18] 刘洪波,梁崇旭,刘飞禹. 考虑含水率影响的花岗岩残积土边坡地震响应分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(02): 342-350.
- [19] 谢瑾荣,周翠英,程晔. 降雨条件下软岩边坡渗流-软化分析方法及其灾变机制[J]. *岩土力学*, 2014, 35(01): 197-203+210.
- [20] 蒋中明,曾铃,付宏渊,等. 极端久雨条件下软岩边坡动态稳定性分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(02): 27-34.
- [21] Xu Y , Liao X , Li J , et al. The effects of water content and dry-wet cycles of weak-interlayer soil on stability of clastic rock slope[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(5): 1-8.
- [22] 钟卓希,盛建龙,胡斌,等. 考虑等效裂隙面的含软弱夹层边坡降雨渗流模型[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(07): 118-124.
- [23] 侯世伟,张永峰,张皓,等. 基于局部软化阶梯双折减法的土坡稳定性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(04): 705-713.